

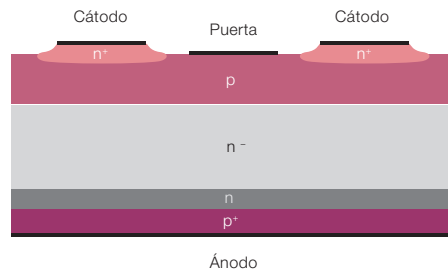


La conmutación se renueva

Avances recientes de las tecnologías de IGCT para la electrónica de alta potencia

UMAMAHESWARA VEMULAPATI, MUNAF RAHIMO, MARTIN ARNOLD, TOBIAS WIKSTRÖM, JAN VOBECKY, BJÖRN BACKLUND, THOMAS STIASNY – A mediados de los 90, ABB presentó un nuevo miembro de la familia de electrónica de potencia: el tiristor conmutado de puerta integrada (IGCT). Como el tiristor de apagado por puerta (GTO) del que deriva, el IGCT es un conmutador semiconductor totalmente controlable que admite las elevadas intensidades y tensiones propias de la electrónica de alta potencia. El IGCT supera al GTO en tiempo de apagado, tamaño, grado de integración, densidad de potencia, etc., y esta superioridad lo ha convertido en el dispositivo de elección para accionamientos industriales de media tensión (MVD). También ha encontrado hueco en otras muchas aplicaciones, como conversión de energía eólica, STATCOM e interconexiones. La tecnología IGCT ha realizado rápidos progresos a lo largo del último decenio.

1 Dispositivo IGCT



1a Corte esquemático de un IGCT asimétrico



1b Vista en planta de una oblea IGCT de 91 mm



1c La oblea IGCT en un paquete hermético con su unidad de puerta integrada

En muchos aspectos, un IGCT es similar a un GTO. Como el GTO, el IGCT es básicamente un interruptor que se enciende y se apaga con una señal de puerta. No obstante, los IGCT presentan ventajas sobre los GTO: soportan mayores velocidades de subida de tensión (por lo que no necesitan circuito amortiguador); las pérdidas de conducción son menores; los tiempos de apagado son más breves y controlables; el tamaño de la celda en la oblea de silicio es menor; y la conexión de puerta sólida utilizada en los IGCT genera una inductancia menor. Además, el circuito de accionamiento del IGCT se integra en el paquete [1] → 1.

En el último par de decenios, los IGCT aparecen por doquier en la electrónica de alta potencia y se encuentran ahora para valores de tensión que van desde 4,5 kV a 6,5 kV y en tres tipos principales: asimétrico, conducción inversa (RC-IGCT) y simétrico o de bloqueo inverso (RB-IGCT).

– Los IGCT asimétricos no pueden bloquear tensiones inversas de más de algunas decenas de voltios. En

consecuencia, se utilizan cuando no se vayan a producir esas tensiones –por ejemplo, en una fuente de alimentación conmutada– o se equipan con un diodo antiparalelo adecuado para conducir corrientes en el sentido inverso. Los IGCT asimétricos tienen el mayor nivel de potencia para un tamaño de la oblea dado.

- Los RC-IGCT tienen un diodo integrado en la misma oblea GCT para conducir corrientes en sentido inverso, pero utilizan un área de oblea que, de otra forma, se podría utilizar para la función de conmutación.
- Los IGCT simétricos pueden bloquear tensiones inversas, pero solo conducen corrientes en el sentido directo.

El diseño de encapsulado hermético del IGCT ha demostrado durante años la fiabilidad sobre el terreno de la protección del semiconductor de potencia y capacidad de ciclos de carga. Al estar formado por unas pocas capas de materiales bien diseñados no hay problemas de vacíos de soldadura o despegado de uniones, como pasa con otras tecnologías.

Tendencias de rendimiento de los IGCT

En los últimos diez años, la tecnología IGCT ha experimentado avances importantes, especialmente en la disminución de las pérdidas por conducción y el aumento

de la densidad de potencia → 2. Los aumentos de potencia son consecuencia de las menores pérdidas y/o las mayores temperaturas operativas, gracias sobre todo a la mayor área de funcionamiento seguro (SOA) del dispositivo, que permite una mayor intensidad de apagado. La potencia absoluta se ha incrementado aumentando el tamaño de la oblea desde 91 mm de diámetro hasta 150 mm y aplicando conceptos de integración que proporcionan una funcionalidad total con una sola oblea en vez de emplear dos dispositivos (IGCT y diodo).

Mayores márgenes: tecnología de alta potencia

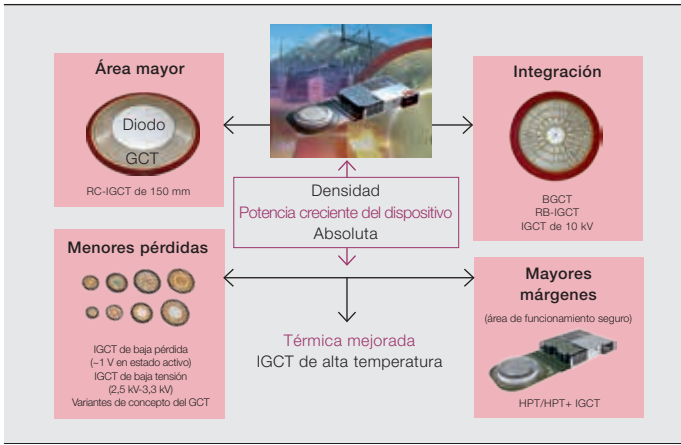
El principal factor limitador de los IGCT clásicos es la capacidad de intensidad de corriente de apagado máxima controlable, no las pérdidas o las limitaciones térmicas. Por lo tanto, la introducción de la plataforma de tecnología de alta potencia (HPT) [2] se ha recibido como un paso adelante en la mejora de las prestaciones de SOA de IGCT al tiempo que sirve de base para el desarrollo futuro.

Un HPT-IGCT proporciona un aumento de la intensidad máxima de apagado de hasta un 40 por ciento a 125 °C. Los HPT-IGCT incorporan un diseño avanzado con una base p corrugada –frente a la unión de base p uniforme estándar– que asegura un funcionamiento en avalancha dinámica uniforme con mayor homogeneidad en todo el diámetro de la oblea durante el apagado del dispositivo → 3. El HPT se ha probado en productos IGCT con tensiones nominales de hasta 6,5 kV. En las pruebas, los HPT-IGCT de 4,5 kV, 91 mm, han apagado intensidades de más de 5 kA y soportado condiciones extremas con una gran inductancia parásita.

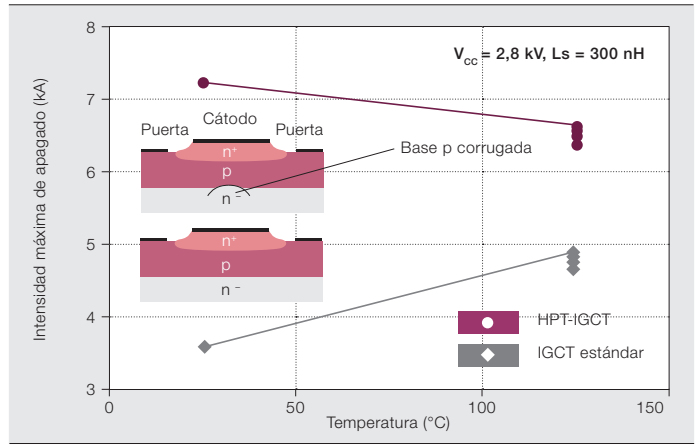
Imagen del título

La invención del IGCT ha cambiado las reglas de la electrónica de potencia. La figura ilustra un IGCT de ABB con unidad de puerta.

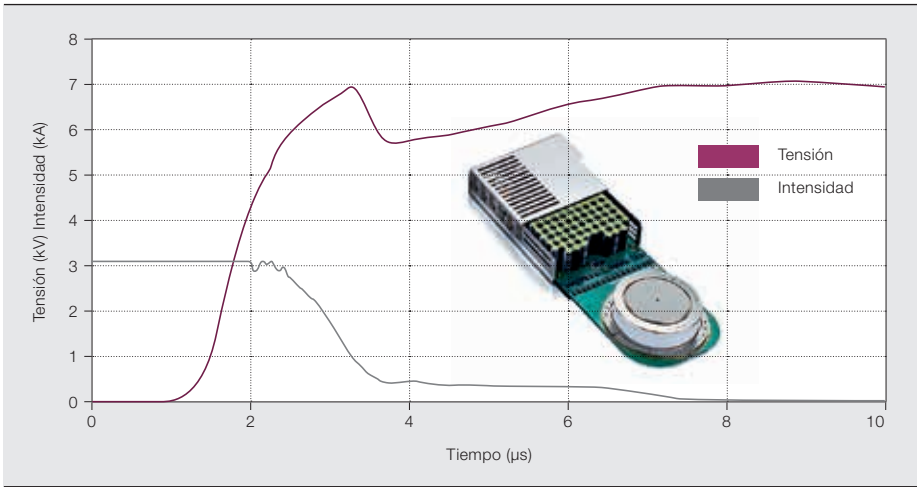
2 Líneas de desarrollo de IGCT para conseguir menores pérdidas y/o mayores capacidades de potencia



3 Resultados experimentales de la intensidad de apagado de HPT-IGCT máxima controlable frente a un IGCT estándar



4 IGCT de 91 mm, 10 kV y sus formas de onda de apagado a 3,3 kA, 5,5 kV y 125 °C



Integración: RB-IGCT

En ciertos casos –como con un interruptor de CC de estado sólido, en aplicaciones de CA o en inversores de fuente de corriente (CSI)– hace falta un dispositivo de conmutación simétrico con bloqueo. Aunque puede lograrse con un IGCT asimétrico conectado en serie con un diodo rápido, la solución preferida es un IGCT simétrico en una sola oblea. Como el rendimiento necesario y ciertos modos de funcionamiento son distintos que en otros IGCT, hay que optimizar el diseño del dispositivo para lograr el bloqueo inverso con pérdidas bajas y un comportamiento de conmutación sólido. Se han desarrollado RB-IGCT de 6,5 kV para aplicaciones CSI y de 2,5 kV para interruptores bidireccionales para CC. Se ha presentado un RB-IGCT de 2,5 kV, 91 mm, con una caída de tensión en estado de activado de solo 0,9 V para la intensidad nominal (1 kA) a 125 °C y una capacidad controlable máxima de corriente de apagado de hasta 6,8 kA a 1,6 kV, 125 °C [3].

Integración: valores nominales de alta tensión (10 kV IGCT)

Se podría hacer un inversor de tres niveles sin conexión en serie para tensiones de línea entre 6 y 6,9 kV si se dispusiera de IGCT con una tensión nominal entre 8,5 y 10 kV. Un dispositivo así tiene un diseño mecánico simple, menor complejidad de control y alta fiabilidad en comparación con la conexión en serie de dos dispositivos de 4,5 o 5,5 kV para tensiones de línea de 6 a 6,9 kV. Para demostrar la viabilidad de esta solución se han fabricado dispositivos para 10 kV con la plataforma HPT y se ha probado que el concepto funciona [4] → 4.

Mejores prestaciones térmicas: IGCT de alta temperatura (HPT+)

Una forma de aumentar la potencia de salida de un diseño de convertidor es aumentar la temperatura nominal del semiconductor de potencia empleado. En funcionamiento continuo, la capacidad del sistema de refrigeración puede limitar dicho aumento. Pero aumentar la

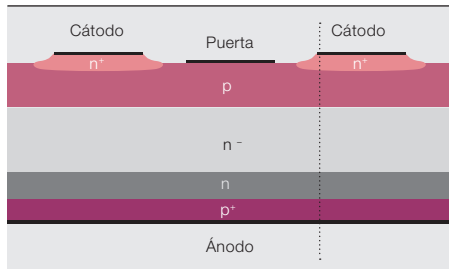
En los últimos diez años, la tecnología IGCT ha experimentado avances importantes, especialmente en la disminución de las pérdidas por conducción y el aumento de la densidad de potencia.

temperatura puede ser una opción válida en funcionamiento intermitente de alta potencia, y se puede lograr mejorando el HPT-IGCT. Por consiguiente, el perfil de dopado de una base p corrugada se ha optimizado para permitir un SOA completo para toda la gama de temperaturas hasta 140 °C. También se han mejorado las conexiones internas, como la metalización de la oblea, para aumentar la resistencia termomecánica al desgaste. Se ha iniciado la verificación de estas mejoras, y los primeros resultados parecen prometedores. Asimismo, la denominada tecnología HPT+ presenta una curva tecnológica claramente mejorada en comparación con la HPT-IGCT debido a su diseño optimizado de base p corrugada [5].

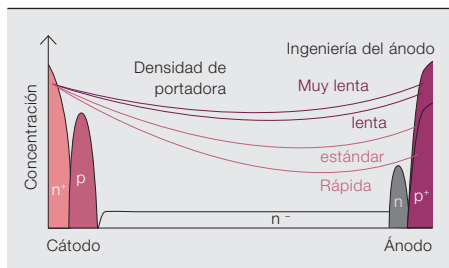
Pérdidas de conducción reducidas: hacia un IGCT de 3,3 kV, estado de activado de 1 V

En los últimos años se ha observado una tendencia clara a emplear topologías multinivel en muchas aplicaciones de electrónica de potencia. Estos produc-

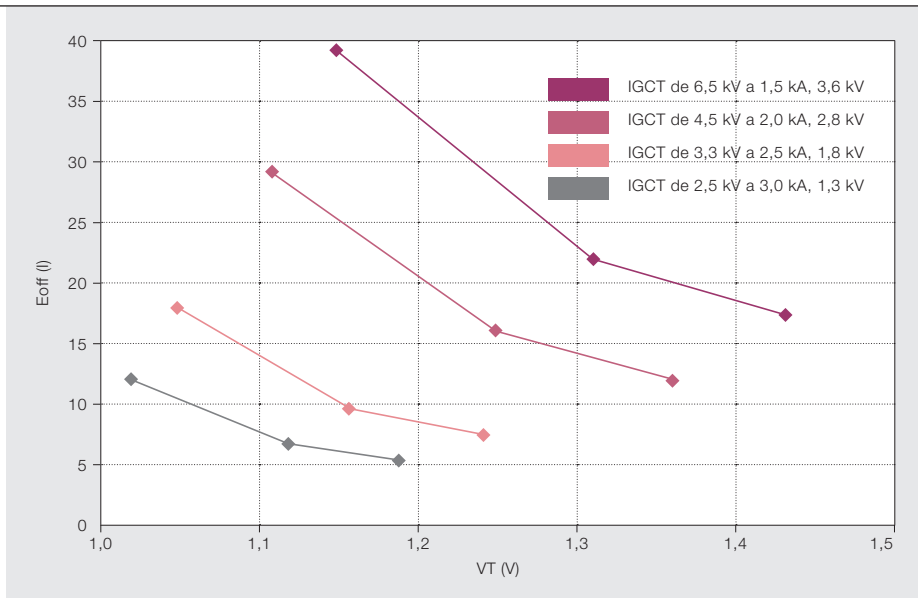
5 Ingeniería anódica del IGCT



5a Estructura del IGCT



5b Dopado del IGCT y perfiles de portadora del ánodo a lo largo de la sección a'-a



5c Curvas de tecnología de distintos IGCT de 91 mm de distintas clases de tensión a 125°C obtenidos con ingeniería de ánodos

Los aumentos de potencia son consecuencia de las menores pérdidas y/o las mayores temperaturas operativas, gracias sobre todo a la mayor SOA, que permite una mayor intensidad de apagado.

tos suelen trabajar con frecuencias de conmutación bastante bajas pero deben ser capaces de intensidades o rendimientos elevados. Por sus propiedades intrínsecas de tiristor de baja pérdida en conducción y función de conmutación dura, el IGCT está predestinado para estas aplicaciones. Por lo tanto, hay que continuar la optimización para lograr tensiones en estado activo muy bajas (~1 V) mediante ingeniería del ánodo y mantener el buen rendimiento general → 5.

Como en un sistema multinivel hay cierta libertad para elegir la tensión del dispositivo, se han llevado a cabo diversas simulaciones y experimentos para una amplia gama de clases de tensión a fin de determinar qué prestaciones se pueden conseguir [6]. Los resultados se resumen en → 5 y dan a los diseñadores de convertidores multinivel la posibilidad de ver cómo optimizar los sistemas con respecto al mínimo total de pérdidas de inversor para una topología y unos valores de tensión e intensidad dados.

Además, se han fabricado los primeros prototipos de RC-IGCT de 3,3 kV para verificar los resultados de la simulación. Se han realizado tres ensayos distintos de inyección del ánodo (A1, A2 y A3) para verificar la posibilidad de que los RC-IGCT de 3,3 kV logren pérdidas de conducción bajas a las mayores intensidades con pérdidas de conmutación razonables [7].

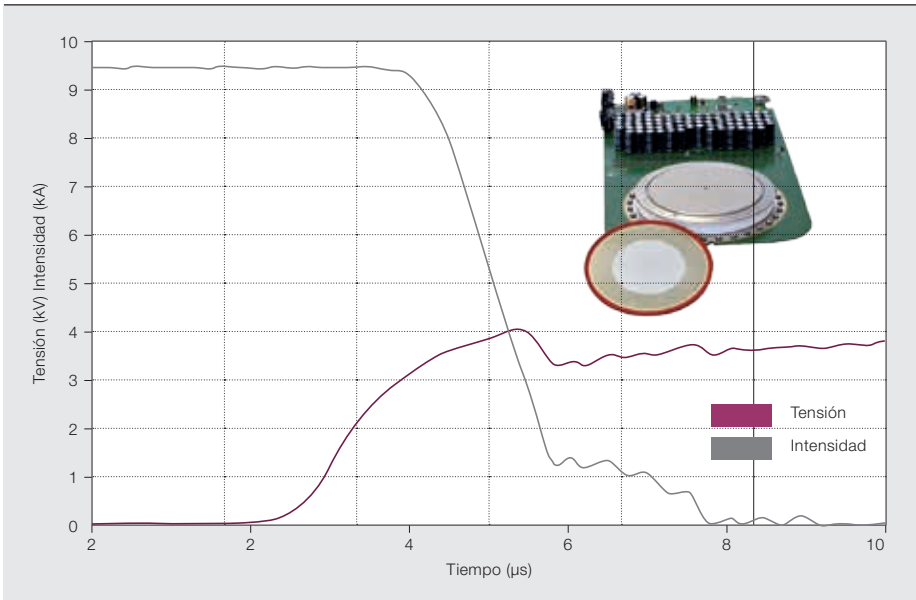
Área mayor: RC-IGCT de 150 mm

La búsqueda de potencias cada vez mayores obliga a utilizar diámetros de silicio mayores. Frente a la tecnología anterior, el HPT es más escalable y permite diseñar dispositivos de tamaño de oblea superior al estándar de 91 mm. Hace poco se han fabricado los primeros prototipos de RC-IGCT de 4,5 kV, 150 mm, basados en tecnología HPT+. Con estos dispositivos se podrán hacer inversores de tres niveles de hasta unos 20 MW sin necesidad de conexiones en serie o en paralelo de semiconductores de potencia [8] → 6.

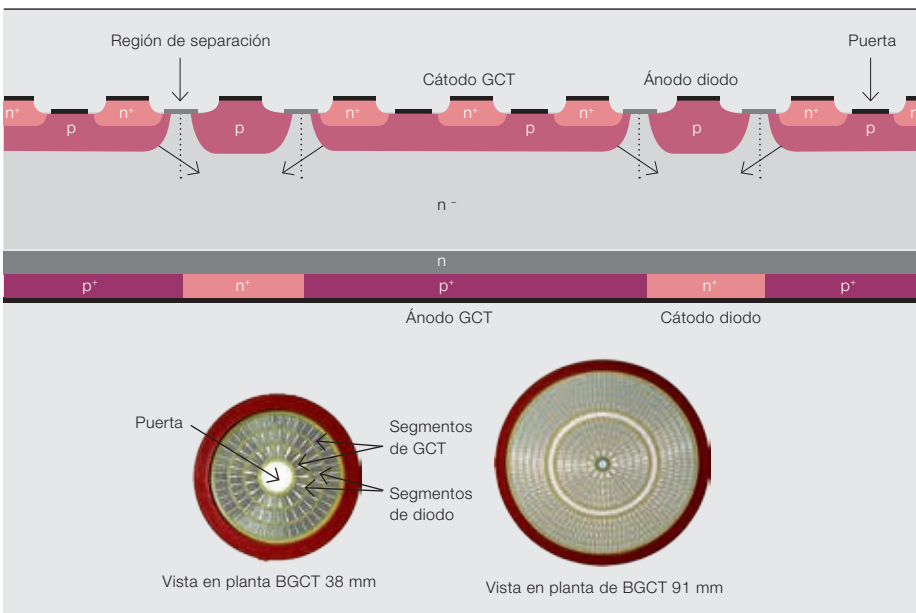
Tendencia futura: integración total con tiristor bimodal de puerta conmutada

El RC-IGCT convencional mejora la integración de componentes en términos de proceso y reducción de componentes del sistema, lo que también mejora la fiabilidad. Como ya se ha explicado, en un RC-IGCT el GCT y el diodo se integran en una sola oblea, pero están totalmente separados entre sí como se muestra en → 2. En consecuencia, la utilización en el RC-IGCT del área de silicio está limitada a la región GCT cuando se trabaja en modo GCT y a la región del diodo cuando se hace en el modo de diodo. Por lo tanto, se ha desarrollado un nuevo concepto de dispositivo totalmente integrado (integración interdigitada) que da lugar al tiristor bimodal de puerta conmutada (BGCT), que integra el IGCT y el diodo en una sola estructura con el mis-

6 RC-IGCT de 150 mm, 4,5 kV y formas de onda de apagado a 9,5 kA, 2,8 kV y 125 °C



7 Corte esquemático del BGCT y prototipos fabricados de 38 mm y 91 mm, 4,5 kV



mo volumen de silicio en los dos modos de GCT y diodo [9] → 7. Cada segmento se comporta como cátodo de GCT o como ánodo de diodo.

Esta integración interdigitada mejora el uso de las áreas de diodo y GCT y la distribución térmica, logra una recuperación inversa más suave y una corriente de pérdida menor que en los RC-IGCT clásicos. El concepto BGCT se ha demostrado experimentalmente con prototipos de 38 mm, 4,5 kV y de 91 mm, 4,5 kV [10], y los resultados confirman las posibles ventajas del BGCT sobre el RC-IGCT convencional.

Esta revisión de tecnologías IGCT recientes con prestaciones y funciones mejoradas da una idea de la prometedora tecnología IGCT. Los diseñadores de sistemas de electrónica de potencia se asoman a un futuro apasionante de nuevas mejoras, con la perspectiva de dispositivos con mayores temperaturas de trabajo, incluso con mejor bloqueo inverso y funciones de conducción inversa, menores pérdidas producidas por un estado activado de 1 V, una gama más amplia de tensiones y mayores áreas de 150 mm o más.

Umamaheswara Vemulapati

ABB Corporate Research
Baden-Dattwil, Suiza
umamaheswara.vemulapati@ch.abb.com

Munaf Rahimo

Tobias Wikström
Jan Vobecky
Björn Backlund
Thomas Stiasny
ABB Semiconductors
Lenzburg, Suiza
munaf.rahimo@ch.abb.com

tobias.wikstroem@ch.abb.com

jan.vobecky@ch.abb.com

bjoern.backlund@ch.abb.com

thomas.stiasny@ch.abb.com

Martin Arnold – antiguo empleado de ABB

Referencias

- [1] Klaka, S., *et al.*, "The Integrated Gate Commutated Thyristor: A new high efficiency, high power switch for series or snubberless operation," Proceedings PCIM Europe, Nürnberg, 1997.
- [2] Wikström, T., *et al.*, "The Corrugated P-Base IGCT – a New Benchmark for Large Area SQA Scaling," Proceedings ISPSD, Jeju, Korea, 2007, pp. 29–32.
- [3] Vemulapati, U., *et al.*, "Reverse blocking IGCT optimised for 1 kV DC bi-directional solid state circuit breaker," IET Power Electronics, Vol. 8, Issue. 12, 2015, pp. 2308–2314.
- [4] Nistor, I., *et al.*, "10 kV HPT IGCT rated at 3200A, a new milestone in high power semiconductors," Proceedings PCIM Europe, Stuttgart, Germany, 2010, pp. 467–471.
- [5] Arnold, M., *et al.*, "High temperature operation of HPT+ IGCTs," Proceedings PCIM Europe, Nürnberg, Germany, 2011.
- [6] Rahimo, M., *et al.*, "Optimization of High-Voltage IGCTs towards 1V On-State Losses," Proceedings PCIM Europe, Nürnberg, Germany, 2013, pp. 613–620.
- [7] Vemulapati, U., *et al.*, "3.3 kV RC-IGCTs optimized for multilevel topologies," Proceedings PCIM Europe, Nürnberg, Germany, 2014, pp. 362–69.
- [8] Wikström, T., *et al.*, "The 150 mm RC IGCT: a device for the highest power requirements," Proceedings ISPSD, Waikoloa, HI, 2014, pp. 91–94.
- [9] Vemulapati, *et al.*, "The concept of Bi-mode Gate-Commutated Thyristor – a new type of reverse-conducting IGCT," Proceedings ISPSD, Bruges, 2012, pp. 29–32.
- [10] Stiasny, T., *et al.*, "Experimental results of a large area (91 mm) 4.5 kV 'Bi-mode Gate Commutated Thyristor' (BGCT)," Proc. PCIM Europe, Nürnberg, Germany, 2016.